ACELERADORES LINEALES DE ELECTRONES



Un acelerador lineal (LINAC, por sus siglas en inglés) personaliza los rayos X de alta energía para que se ajusten a la forma un tumor y destruyan las células cancerosas sin afectar el tejido normal circundante. Cuenta con varios sistemas de seguridad incorporados para asegurar que no emitirá una dosis más elevada que la indicada, y el físico médico lo revisa periódicamente para asegurarse de que funcione correctamente.

Si le han programado un tratamiento utilizando LINAC, su radioncólogo colaborará con un dosimetrista de radiación y un físico médico para desarrollar un plan de tratamiento para usted. Su médico hará un doble control de este plan antes de comenzar el tratamiento e implementará procedimientos de control de calidad para garantizar que cada tratamiento sea administrado exactamente de la misma manera.

¿Para qué se usa este equipo?

Un acelerador lineal (LINAC) es el dispositivo que se usa más comúnmente para dar radioterapia de haz externo a enfermos con cáncer. El acelerador lineal también se puede usar para tratar todas las partes/órganos del cuerpo. Suministra rayos X de alta energía a la región del tumor del paciente. Estos tratamientos con rayos X pueden ser diseñados de forma que destruyan las células cancerosas sin afectar los tejidos circundantes normales. El LINAC se usa para tratar todas las partes del cuerpo usando terapias convencionales, radioterapia de intensidad modulada (IMRT), radioterapia con guía por imágenes (IGRT), radiocirugía estereotáctica (SRS) y radioterapia estereotáctica del cuerpo (SBRT).

¿Cómo funciona este equipo?

El acelerador lineal utiliza tecnología de microondas (similares a la que se usa para radar) para acelerar los electrones en la parte del acelerador llamada "guía de ondas", y luego permite que estos electrones choquen con un blanco de metal pesado para producir rayos X de alta energía. Estos rayos X de alta energía son moldeados a medida que abandonan la máquina para formar un haz que asemeja la forma del tumor del paciente, y este haz personalizado es dirigido al tumor del paciente. El haz puede ser formado ya sea por bloques puestos en la cabeza de la máquina o por un colimador de multihoja incorporado en la cabeza de la máquina. El paciente yace sobre un sillón movible de tratamiento y se usan rayos láser para asegurar que el paciente esté en la posición adecuada. El sillón de tratamiento se puede mover en varias direcciones, como ser hacia arriba, hacia abajo, a la derecha, a la izquierda, hacia adentro y hacia afuera. El haz sale de una parte del acelerador llamada gantry, que puede ser rotada alrededor del paciente.

La radiación se puede administrar al tumor desde cualquier ángulo rotando el gantry y moviendo la camilla de tratamiento.

¿Quién maneja este equipo?

El radioncólogo del paciente determina cuál es el volumen apropiado del tratamiento, cuáles estructuras normales deben evitarse, cuál dosificación es necesaria para el tumor y cuál dosificación es segura para las estructuras normales. El radiofísico médico y el dosimetrista determinan cómo suministrar la dosis prescrita y calculan el tiempo necesario para que el acelerador lineal suministre esa dosis. Los radioterapeutas manejan el acelerador lineal y administran a los pacientes sus tratamientos diarios de radiación.

¿Cómo se garantiza la seguridad?

La seguridad del paciente es muy importante y se asegura de varias formas.

Antes de que se administre el tratamiento al paciente, el oncólogo radioterapeuta, en colaboración con el dosimetrista y el radiofísico médico, desarrolla y aprueba un tratamiento. El plan es verificado dos veces antes de que se administre el tratamiento, y procedimientos de control de calidad aseguran que el tratamiento sea administrado según lo planeado.

El control de calidad del acelerador lineal también es muy importante. Hay varios sistemas incorporados en el acelerador para que no suministre una dosis más alta que la prescrita por el radioncólogo. Todas las mañanas, antes de iniciar los tratamientos, el radioterapeuta realiza verificaciones en la máquina, usando un equipo denominado "rastreador", para asegurar que la intensidad de la radiación sea uniforme a través del haz y que esté funcionando correctamente. Además, el radiofísico revisa de manera más minuciosa de forma semanal y mensual el acelerador lineal y el equipo de control de la dosificación.

Las máquinas de radiación modernas tienen sistemas de verificación internos que no permiten que la máquina se encienda a menos que se hayan cumplido todos los requisitos estipulados para el tratamiento.

Durante el tratamiento, el radioterapeuta observa constantemente al paciente utilizando un monitor de televisión de circuito cerrado. Además, en la sala de tratamiento hay un micrófono para que el paciente pueda hablar con el terapeuta si fuera necesario. Se observan, en forma regular las películas de entrada (radiografías tomadas con el haz de tratamiento) u otras herramientas de imágenes, tales como la TC de haz cónico, para cerciorarse de que la posición del haz no se desvíe del plan original.

La seguridad del personal que opera el acelerador lineal también es importante. El acelerador lineal se encuentra en una sala con paredes de plomo y concreto de manera tal que los rayos X de alta energía queden adentro de la sala y que ninguna persona afuera de la habitación quede expuesta a los rayos X. El radioterapeuta debe encender el acelerador desde afuera de la sala de tratamiento. Debido a que el acelerador emite radiación sólo cuando está encendido, el riesgo de una exposición accidental es bajo.

Objetivo de la Radioterapia.

Entregar una dosis tumoricida precisa en el volumen blanco de planificación y al mismo tiempo minimizar la dosis en los tejidos adyacentes. Para ello se debe contar por un lado con un equipo de terapia para impartir la dosis eficientemente y por otro con un equipo de dosimetría capaz de predecir la dosis del anterior.

Equipos de radioterapia. Las modalidades para impartir la dosis en RT son:

Braquiterapia: la fuente de irradiación está cerca o en el área a tratar

Teleterapia o terapia externa: fuente de irradiación está a cierta distancia del paciente en equipos de grandes dimensiones.

Equipos de dosimetría. Los métodos más utilizados son Iono métrico, film y diodos. A continuación, se describirán los principales equipos utilizados en terapia y en dosimetría.

- Desarrollo-Equipos de teleterapia
- La bibliografía (Khan 1994) los clasifica según la energía del haz que emiten.
- Equipos de baja y media energía.
- Equipos de alta energía o Mega voltaje
- Equipos de Radioterapia y Dosimetría

Equipos de baja energía o de terapia superficial.

El principio de funcionamiento de éstos es igual al de los equipos de rayos X convencionales. Operan con tubos con potenciales picos varían entre 50 y 150 kV. Por su baja energía son rápidamente atenuados por el medio por lo que se usan para

irradiar lesiones de menos de 5 mm de profundidad. Los filtros de aluminio que se colocan directamente por debajo de la unidad emisora tienen como fin absorber la radiación más blanda homogeneizando el espectro de emisión.

Desarrollo-Equipos de teleterapia

Equipos de media energía (Ortovoltaje).

Trabajan en el rango de 150 a 500 KV, aunque los equipos existentes operan entre 200 y 300 kV. Son utilizados para lesiones de hasta 3 cm de profundidad. Se agregan, también, filtros, tanto de aluminio como de cobre, para reducir la radiación más blanda que afecta inútilmente la piel. Si bien en nuestro país todavía se operan estos equipos, se han dejado de fabricar hace tiempo.

Partes más importantes equipos de RX

- Cabezal
- Tubo de rayos X
- Aplicadores de distinta longitud y tamaño de campo
- Filtros para determinar la calidad de la radiación
- Camilla de tratamiento
- Consola

- Tensión de tubo y corriente de filamento
- Temporizador para controlar la exposición

Equipo de Megavoltaje

Haces de electrones o de rayos X generados por frenado de electrones de un potencial acelerador nominal mayor que 1 MV y equipos que utilizan isótopos radioactivos como fuentes (Co60 y Cs137).

Los haces de rayos X se los refiere con la energía máxima del espectro en MV para fotones y MeV para electrones y para Co60. Se utilizan índices de calidad como es el D20/10 para haces de fotones de megavoltaje y el HVL (half value layer o capa hemirreductora) para haces de baja y media energía.

El espectro del haz de Co60 tiene dos picos, a 1,17 y a 1,33 MeV, dando una energía de fotón media de aproximadamente 1,25 MeV y considerando al haz de esta fuente monoenegético. Estos equipos son de gran versatilidad y permiten al combinar los movimientos de la camilla y el gantry para incidir con el haz de la mejor manera en el paciente. Cabezal. Bastidor de capa gruesa de material de blindaje de alto peso atómico (Pb, W, o una aleación de ambos).

Fuente. Cilindro de 1 a 2 cm diámetro (penumbra) conteniendo el material radioactivo en forma de rodillo o cilindros y doblemente encapsulada por acero inoxidable. Sus actividades van de 5000 a 10000Ci. La fuente es expuesta para llevar a cabo la irradiación por distintos mecanismos. Actualmente la mayoría utiliza un cilindro neumático para deslizarse desde posición ON a OFF y viceversa. Poseen un sistema de seguridad que guarda la fuente en caso de fallo.

Cabezal. Sistema de luz localizadora de campo. la fuente está en posición OFF reproduciendo la geometría del haz de irradiación e indicando su eje central. Un indicador óptico de distancia fuente-superficie o telémetro.

Sistema de colimación. De material uranio o tungsteno. definen el tamaño de campo a irradiar de 4x4 a 35x35 cm2.

Trimmers. Se mueven solidarios al anterior. Son extensibles hasta la piel del paciente. Disminuyen penumbra.

Porta-accesorios. Cuñas y bandejas porta bloques conformadores de campo. Distancia entre 15 y 20 cm para evitar contaminación electrónica.

Puente o gantry. Cumple las funciones de soporte mecánico del cabezal, transmisión de las señales de comando al cabezal y define el ángulo de incidencia del haz de radiación.

Camilla: sirve de soporte del paciente y cumple una importante función en la determinación de las condiciones geométricas del tratamiento; suele alojar distintos controles que actúan sobre el equipo.

Estativo. Aloja dispositivos mecánicos y de control, además de servir de sostén al conjunto.

Consola. Controla las variables de posicionamiento y seguridad del equipo. Temporizador (doble e independiente), interrupción manual en caso de falla, etc. La emisión de fotones por un acelerador lineal responde al mismo principio que los equipos de rayos x, con la diferencia de que los electrones, al impactar en el blanco, poseen una energía de varios MeV. Básicamente el principio de funcionamiento es el siguiente. Se inyectan de manera pulsante electrones y campos de radiación de microondas en un tubo de aceleración, de modo que los electrones de alta velocidad entran a la guía de ondas al mismo tiempo en que son energizados por las microondas. Se acelera de esta manera los electrones desde unos KeV hasta varios MeV a la salida del tubo acelerador donde luego impactarán en el blanco para generar los Rayos X por frenado.

Fuente de alimentación y Modulador. Proveen la alta tensión (100kV), alta "corriente" (100A) y los pulsos de corta duración (1useg) requeridos por la fuente de microondas y la

fuente de iones. Fuente de iones o cañón de electrones. Cátodo de filamento incandescente que emite termoiónicamente los paquetes de electrones luego ingresarán al tubo acelerador.

Generador de microondas. Pueden ser del tipo osciladores de alta potencia llamados magnetrón o amplificadores de microondas llamados klistrón.

Tubo acelerador o guía de onda: La guía de onda consta de una serie de discos con separaciones crecientes entre ellos que forman las cavidades de la estructura aceleradora en la que se aplicó alto vacío.

Deflector magnético: es un imán cuya función es desviar el haz de electrones que circula por el tubo acelerador y enfocarlo hacia el blanco o las folias dispersoras.

Blanco (para fotones) y/o folias dispersoras (para electrones): los blancos están hechos material de alto Z (W). Para el modo de tratamiento con electrones, el blanco se mueve horizontalmente y las folias dispersoras toman el lugar del blanco. Éstos son finas láminas metálicas usualmente de Pb. Existen aceleradores donde los electrones son dispersados por barrido electromagnético.

Filtro aplanador. Para compensar la distribución angular directa de los rayos X y uniformizar planamente la intensidad del haz de fotones se utilizan estos filtros.

Sistema monitor de dosis: Consisten en 2 sistemas de monitoreo de cámaras de ionización independientes entre sí (+timer). La sensibilidad se ajusta de modo de tener una tasa de dosis en condiciones de referencia de 1 cGy/UM. Los sistemas de monitoreo están dispuestos en sectores de modo de verificar y corregir por retroalimentación planicidad y simetría de haz.

Sistema de luz localizadora en el cabezal del equipo: Una combinación de espejos y una fuente de luz localizadas en el espacio entre las cámaras y los colimadores secundarios proyectan un haz de luz reproduce geométricamente el haz de irradiación. Telémetro o indicador luminoso distancia superficie.

Sistema de colimación (W): Colimador primario. Define el máximo tamaño de campo circular que puede ser contenido por el sistema móvil de colimación

Colimador secundario: Cuatro bloques móviles que definen tamaños de campo rectangulares de hasta 40x40 cm2.simétrica o asimétricamente.

MLC: Consiste en un arreglo de bloques u hojas que se mueven independientemente unas de otras generando geometrías de campo no estándares.

Conos o aplicadores de electrones: Sistema de colimación auxiliar que se agrega a los anterior y que se extiende hasta o próximo a la piel del paciente.

Accesorios modificadores de haz: Bandejas porta bloques, compensadores o cuñas, degradadores de haz.

Sistemas auxiliares. Sistema de vacío para guía de onda y generador de microondas. Sistema de refrigeración para blanco, guía de onda, circulador y generador de microondas.

Sistema neumático para algunos movimientos como el del blanco y de los distintos sistemas conformadores de campo.

Sistema de movimiento de la unidad de tratamiento: este sistema comprende el mecanismo para la rotación del equipo y un sistema de suministro de energía para alimentar el sistema mecánico.

Tele cobaltoterapia versus Acelerador lineal de electrones

TCT tiene una vida media relativamente larga, emisión de fotones gamma energía relativamente alta y medios relativamente simples de producción. Linac produce haces de fotones y electrones de un amplio rango de energías. Linac tiene un diseño más complejo en parte debido versatilidad para llevar a cabo multimodalidades, debido a la lógica computacional y los microprocesadores propios de los sistemas de control de estos equipos y por capacidades que se le han dado en estos años como cuñas dinámicas, MLC, IMRT, terapias de arco de electrones, entre otros.

La simplicidad de operación y el bajo costo les aseguran a los equipos de telecobaltoterapia muchos años más de vida y sobre en los países en vías de desarrollo donde el segundo de los factores juega un rol muy importante.

La radioterapia moderna exige un nivel de exactitud en la dosis depositada en el volumen blanco de +/- 5% (ICRU-1999). El objetivo de la dosimetría es poder predecir la dosis absorbida en los tejidos, normales y neoplásicos, de los pacientes tratados en radioterapia. Un sistema dosimétrico es un conjunto de dispositivos capaces de medir, directa o indirectamente, una magnitud como exposición, kerma o dosis.

Características deseables de un dosímetro. Exactitud y precisión. Lectura directa. Resolución espacial y tamaño físico. Independencia direccional. Independencia con la energía. Independencia con la tasa de dosis. Linealidad.

Si bien existen distintos dosimétricos, el más usado en la práctica clínica es el Sistema dosimétrico de Cámara de ionización. Éste se desarrollará a continuación y luego se verá rápidamente las características más importantes de los demás sistemas.

Sistema dosimétrico de cámara de ionización (cámara de ionización): Predicen de manera indirecta la dosis, ésta se obtiene del registro obtenido por el sistema corregido por una serie de factores propios de algún protocolo y los entregados por los laboratorios de calibración. Compuesto por cámara de ionización, electrómetro y fantoma.

Cámara de ionización cilíndrica o dedal: Cavidad rodeada por una pared externa conductora y el otro electrodo al medio de dicha cavidad. El electrodo central y el externo están separados por un aislante para evitar pérdidas. Poseen volúmenes activos que van desde 0,1 a 1 cm3 y longitudes internas y diámetros de aprox. 2,5 mm y 7 mm, respectivamente. Sus paredes son de bajo Z (aires equivalentes) con espesores menores a 0,1 g/cm2 y poseen un electrodo central de aluminio. Se recomienda su uso en fotones de media, alta energía y electrones > 10 MeV.

Cámara de ionización plano-paralela: Consiste en dos paredes planas, una que anterior que sirve como ventana y electrodo de polarización y la pared posterior como electrodo colector y sistema de anillo de guarda. La pared anterior es algún plástico conductor o algún material aislante (poliestireno) y alguna delgada capa de material conductor como el grafito. Su uso se recomienda para haces de electrones 10MeV y fotones de baja energía.

Cámaras de extrapolación: Son cámaras plano-paralelas con un volumen sensible variable. Se usan para medir dosis en superficies de fantomas irradiados. La distancia entre electrodos se va cambiando con las lecturas y luego se estima la dosis superficial extrapolando a distancia cero entre electrodos.

Cámaras para BQT: Son cámaras de gran volumen (250 cc o más). Son del tipo cámara de reentrada o well-chamber. Están calibradas en valores de kerma en aire.

Sistema dosimétrico de cámara de ionización (Electrómetro): Colecta las cargas generadas en la cámara de ionización. Es un dispositivo capaz de medir cargas < 10-9 A. Éstos lo logran gracias al amplificador operacional de retroalimentación negativa que tienen incorporado a su electrónica con impedancia de entrada >1012 ohm.

Sistema dosimétrico de cámara de ionización (fantoma o maniquí): Cuba de acrílico de paredes de aprox. 1cm y relleno de agua (tejido equivalente) cuyas dimensiones son las requeridas para tener condiciones de dispersión completa (50x50x50cm3). También su usan planchas de acrílico o material agua equivalente para llevar a cabo dosimetrías cuya periodicidad lo justifique.

Dosímetros Films: Proveen una excelente resolución espacial 2D y en una sola exposición dan una buena idea acerca de la distribución espacial de radiación en un área de interés. La densidad óptica se define como OD = log10 (Io/I) y es función de la dosis. Los films son usados generalmente para dosimetrías cualitativas y con una calibración adecuada, uso cuidadoso y un correcto análisis, también se puede usar para evaluar la dosis. La relación entre la dosis y OD generalmente no es lineal por tanto debe generarse una curva dosis vs. OD llamada sensitometría para cada film antes de tratar de predecir la dosis.

Dosímetros termoluminiscentes: Se utilizan materiales (LiF-agua equivalente) que retienen la energía absorbida para luego al ser sometido a una fuente de calor la libera en

forma de radiación UV, IR o visible. Una correcta calibración permite utilizarlo en la práctica clínica para llevar a cabo dosimetrías in vivo.

Dosimetría por semiconductores: Son materiales dopados con electrones o receptores de electrones que responden a la radiación ionizante generando un flujo de corriente que va a ser luego sensada por el electrómetro. Generalmente son del tipo p-Si ya que son los menos afectados por la radiación. Son muy utilizados en dosimetría in vivo, pero deben tenerse algunas precauciones en cuanto a su dependencia con las condiciones climáticas, angulares y energéticas y dependencia con la tasa de exposición, tiene como gran ventaja las lecturas en tiempo real.

Desarrollo- Técnicas y procedimientos especiales en RT: Además de las técnicas de tratamientos rutinario usado en clínicas y departamentos de radioterapia estándar, existen diversas técnicas específicas usadas para procedimientos especiales.

Irradiación estereotáxica: Llamada así a las técnicas de irradiación focalizadas que depositan la dosis prescripta de radiación ionizante en una lesión primaria preseleccionada y esterotáxicamente localizada en cerebro. La forma más común de llevarla a cabo es mediante tele terapia (radiocirugía y radioterapia). Marcos de Leksell. En la radiocirugía por medio de linacs, se usa sólo un colimador y se administran sucesivamente haces de múltiple convergencia; mientras que en el equipo de "gamma knife" los haces se administran en forma simultánea utilizado las 201 fuentes de Co60.

Radioterapia por intensidad modulada (IMRT): Es una forma de radioterapia conformada que combina diversos haces de intensidades moduladas (The British Institute of Radiology 2000). Se basa en ITP para la determinación de los mapas de haces de intensidad modulada y en imágenes multimodales 3D.

- Implementación
- Compensadores metálicos
- Colimadores multihojas
- Segmentos múltiples por campo (step and shoot)
- MLC dinámicos (sliding window)

Tomoterapia: Equipo de tomografía helicoidal con fuente de rayos X de terapia. Permite verificar utilizando imágenes 3D MVCT, que los volúmenes a irradiar antes de cada tratamiento se corresponden con los planificados. En esta modalidad, el paciente se mueve dentro del anillo del tomógrafo simultáneamente con el giro del gantry, tal como se hace en tomografía helicoidal, mientras un haz de intensidad modulada está siendo disparado sobre él.

Terapia por Captura Neutrónica en Boro (BNCT): Es un tipo de terapia que provee un mecanismo de destrucción celular sin dañar células sanas adyacentes. está basado en la reacción nuclear que ocurre cuando un isótopo estable de Boro10 es irradiado con neutrones

de baja energía para producir los nucleidos He4 (partículas alfa) y Li7. Éstos depositan su energía localmente y así destruyen selectivamente las células tumorales. Los neutrones pueden ser generados por un acelerador de partículas o por un reactor nuclear.

Bibliografía:

1. *Khan, F. M. (1994). Tratamiento de cáncer con radiación: Principios y práctica. Lippincott Williams & Wilkins.*
2. *The British Institute of Radiology. (2000). Intensidad modulada en radioterapia. Informe de BIR no. 1.*
3. *International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). (1999). Prescribing, Recording, and Reporting Photon Beam Therapy (Report 50). Bethesda, MD: International Commission on Radiation Units and Measurements.*
4. *Toburen, L. H., y Nordstrom, F. R. (1998). Dosimetría en radioterapia: Aplicaciones para físicos médicos. AAPM.*
5. *Rivard, M. J., y Butler, W. M. (2012). Manual de dosimetría clínica en radioterapia. CRC Press.*
6. *Podgorsak, E. B. (2005). Radioterapia: Física del equipo. Springer.*
7. *Leksell, L., y Leksell, D. (1990). Stereotactic Gamma-Ray Surgery. Acta Chirurgica Scandinavica, 156(1), 377-381.*
8. *Mohan, R., Wu, Q., y Manning, M. (2000). Optimization of Intensity-Modulated Radiotherapy Plans Based on the Equivalent Uniform Dose. International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics, 46(4), 959-963.*
9. *Mackie, T. R., y Kappas, C. (2003). Tomotherapy: From concept to clinic. Medical Physics, 30(8), 2360-2369.*
10. *Barth, R. F., Soloway, A. H., Fairchild, R. G., y Boron Neutron Capture Therapy. (1992). Cancer Treatment and Dosimetry. CRC Press.*
11. *Costa, R. A. (2003). Terapia de captura de neutrones de boro: Un enfoque clínico y preclínico. Cambridge University Press.*
12. *Wallner, P. E., y Fairbanks, R. K. (2010). Aceleradores lineales en oncología: Una guía práctica para físicos médicos y radioterapeutas. Medical Physics Publishing.*



XAVIER PARDELL